

Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica*

Martín Torres Duggan^{1,3} y Mónica B. Rodríguez^{2,3}

(1) Tecnoagro. torresduggan@tecnoagro.com.ar

(2) Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

(3) Comisión de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal-AACS

*Presentado en el Simposio de Fertilidad 2009. IPNI Cono Sur. Fertilizar Asociación Civil. 12 y 13 de mayo de 2009. Rosario, Pcia. De Santa Fe, Argentina.

1.-Importancia del azufre y requerimientos de fertilización.

El azufre (S) es un nutriente esencial para la nutrición vegetal, siendo los requerimientos de los cultivos similares a los de fósforo (P), pero considerablemente más bajos que nitrógeno (N) y potasio (K). Desde el punto de vista productivo, las deficiencias de S en agro-ecosistemas impactan a través de: disminución en el rendimiento, menor calidad de productos cosechados, mayor susceptibilidad a enfermedades y reducción en la eficiencia de uso de otros nutrientes como N, P y algunos nutrientes como Zn, Fe, Cu, Mn y B, entre otros.

Las deficiencias de S comenzaron a manifestarse y difundirse a nivel global hace relativamente pocos años en regiones donde hasta hace poco tiempo la disponibilidad de este nutriente resultaba suficiente (Eriksen, 2005). Las principales razones son: regulaciones ambientales de las emisiones de SO₂; incremento en la utilización de fertilizantes con alto grado y bajo contenido de S y aumento en los rendimientos debido a la aplicación de nuevas tecnologías. Estimaciones efectuadas por el Instituto Internacional del Azufre basadas en la demanda de S de los cultivos indican que la deficiencia de S global es de alrededor de 9,6 billones de toneladas anuales y se proyecta para el 2015 un déficit de 11,9 millones de toneladas (Fan & Messick, 2007). En la Figura 1 se muestran los valores de deficiencias de S en diferentes regiones del mundo.

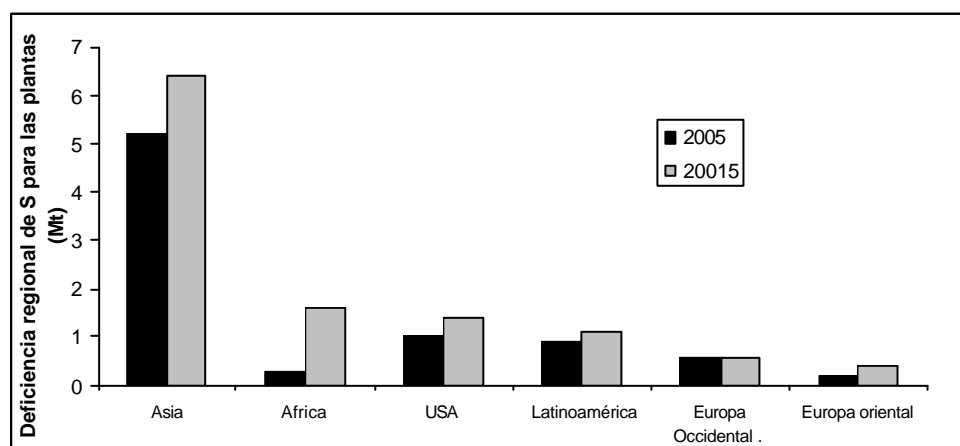


Figura 1. Deficiencias de S en 2005 y proyectada a 2015 (Fan & Messick, 2007).

En la Argentina, los balances de S en rotaciones de cultivos han comenzado a mostrarse negativos en los últimos años. El mayor consumo de S se atribuye a la soja, seguido por el maíz y el trigo cuya absorción es varias veces menor (Rodríguez 2008). La fertilización azufrada comenzó a difundirse hace pocos años, comenzando en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. En esta zona se verificaron deficiencias y respuestas al agregado de S en soja, trigo y maíz, en lotes con

prolongada historia agrícola, bajos contenidos de MO y manejo bajo siembra directa (Echeverría, 2005; Gutiérrez Boem, 2006). Posteriormente, las deficiencias de S se encontraron en otros ambientes edáficos de diferentes localidades del norte, centro y oeste de Buenos Aires y Entre Ríos (Darwich, 2005). Las respuestas medias a la fertilización en la Región Pampeana argentina para dosis de 5-20 kg ha⁻¹ de S como SO₄²⁻ son de 200-500 kg ha⁻¹ en trigo y soja, y de 400-700 kg ha⁻¹ en maíz (FAO, 2004). La progresiva aparición de áreas con deficiencias de S determinó que los productores comenzaran a incorporar el S dentro de los programas de fertilización, mejorando progresivamente los balances de S en los agro-ecosistemas. Así, la reposición de este nutriente pasó del 5% en 1998 a cerca del 30% en 2007, considerando el promedio de los principales cultivos de la Región Pampeana (soja, trigo, maíz y girasol) (IPNI, 2007).

Las buenas prácticas de manejo de fertilizantes pueden ser aplicadas a través de la elección correcta de la fuente, dosis, momentos y formas de aplicación (Roberts, 2007). Asimismo, existe una relación de dichos ítems de la tecnología de la fertilización entre sí y con las prácticas agronómicas llevadas a cabo en el sistema de producción (Bruulsema *et al.*, 2008).

El mercado de fertilizantes azufrados creció marcadamente en los últimos años, tanto en consumo aparente como en diversidad de productos ofrecidos. La mayor variedad de fuentes, presentaciones físicas y formas de despacho de productos requieren de un mayor conocimiento de las propiedades y funcionamiento de las fuentes azufradas en el sistema suelo-cultivo. El objetivo del presente trabajo es presentar las propiedades y atributos de los fertilizantes azufrados, con énfasis en la influencia de las mismas en la efectividad agronómica.

2.-¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DE LAS FUENTES AZUFRADAS?

La calidad de los fertilizantes es evaluada básicamente por las propiedades químicas y físicas (Fertilizer Manual, 1998). Las propiedades químicas (contenido de nutriente, forma y disponibilidad para el cultivo) y su efectividad agronómica (respuesta a la fertilización) son factores muy relevantes cuando se selecciona un fertilizante. Las propiedades físicas y la resistencia al deterioro del fertilizante, tienen incidencia en el procesamiento, manipuleo, almacenamiento, aplicación a campo y también en la efectividad agronómica.

2.1.-Propiedades químicas de fuentes azufradas

Grado equivalente, forma química, solubilidad y disponibilidad para las plantas

En la Tabla 1 se presentan los principales fertilizantes azufrados utilizados en agricultura, su presentación, grado equivalente, forma química y contenido de S. El sulfato de amonio y superfosfato simple de calcio dominan el consumo mundial de fertilizantes azufrados, representando alrededor del 75% del volumen comercializado (Fertilizantes, América Latina, 2004). Sin embargo, en las últimas décadas, fuentes sólidas como el azufre elemental (AE) o líquidas como el tiosulfato de amonio, están incrementando su participación en el mercado. En la Región Pampeana argentina, las principales fuentes azufradas sólidas utilizadas en cultivos de granos son el sulfato de amonio (SA, 21 % de N y 24% de S), yeso agrícola (YS, 12-18% de S según pureza) y superfosfato simple de calcio (SPS, 21% de P₂O₅ y 12% de S) (Torres Duggan, 2008). La demanda histórica de SA tradicionalmente se cubría a partir de la industria del acero, donde se lo obtenía como subproducto. Sin embargo la gran demanda posterior fue suplida por la importación desde USA, donde se lo produce como co-producto de la fabricación de la caprolactama (Melgar, 2005). El YS en cambio proviene diversos recursos geológico-mineros en varias provincias argentinas (Ponce y Torres Duggan, 2005). En cuanto al SPS, la Argentina dispone de una planta de elaboración y también se lo importa desde diversos orígenes. Todas estas fuentes azufradas son

100% solubles en agua y contienen S en forma biodisponible ($S-SO_4^{2-}$), a diferencia del S elemental (AE) que es insoluble en agua y debe oxidarse en el suelo para proveer SO_4^{2-} al cultivo.

Tabla 1. Principales fuentes azufradas utilizadas en agricultura (adaptado de Fertilizer Manual, 1998 e PPI, 1997).

Fertilizante	Fórmula química	% de S	Forma S
Sulfato de amonio	$(NH_4)_2SO_4$	24	SO_4^{2-}
Tiosulfato de amonio	$(NH_4)_2S_2O_3$	26	$S_2O_3^{2-}$
Tiosulfato de potasio	$K_2S_2O_3$	17	$S_2O_3^{2-}$
Sal de Epsom	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	13	SO_4^{2-}
Yeso agrícola	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	12-18	SO_4^{2-}
Sulfato de magnesio hidratado	$MgSO_4 \cdot H_2O$	22	SO_4^{2-}
Sulfato de magnesio anhidro	$MgSO_4$	26	SO_4^{2-}
Sulfato de potasio y magnesio	$K_2SO_4 \cdot 2 MgSO_4$	22	SO_4^{2-}
Sulfato de potasio	K_2SO_4	18	SO_4^{2-}
Azufre elemental	S^0	30-100	S^0
Superfosfato simple	$Ca(H_2PO_4)_2$ + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	14	SO_4^{2-}
Superfosfato triple	$Ca(H_2PO_4)_2$ + $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	<1	SO_4^{2-}

La solubilidad en agua y reactividad en el suelo de los fertilizantes azufrados difiere según la fuente (Figura 2).

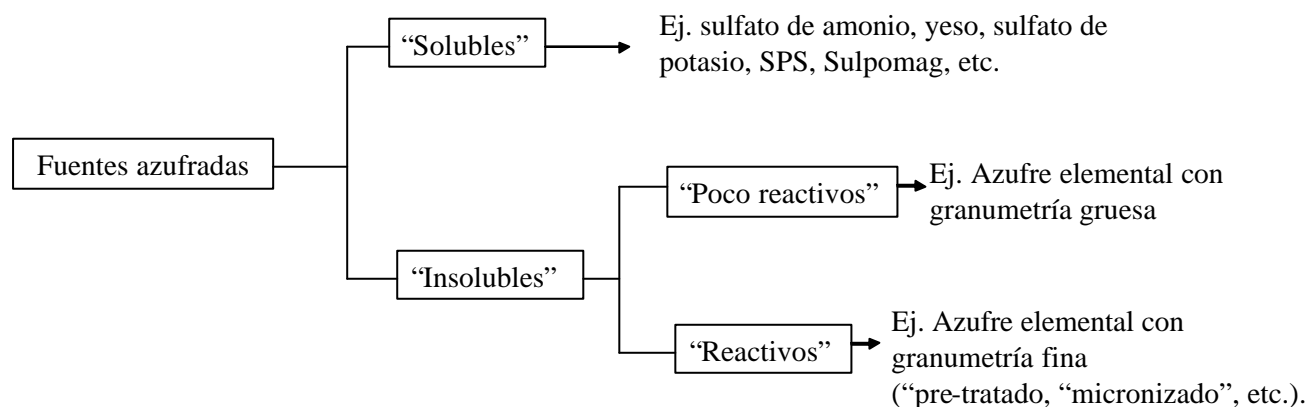


Figura 2. Solubilidad en agua y reactividad en suelo de fuentes azufradas,

Entre las fuentes sulfatadas solubles, el YS es la que presenta la menor solubilidad ($2,6 \text{ g L}^{-1}$ a 25°C), considerablemente más baja que las sales solubles (Porta *et al.*, 2003). Por otra parte, su pureza puede variar considerablemente (Torres Duggan, 2007). Las fuentes sulfatadas que también aportan Mg o K (sulfato de magnesio, sulfato de potasio, sulpomag) se utilizan en cultivos intensivos y su descripción excede el alcance del presente trabajo.

Entre las fuentes de AE podemos encontrar diferencias considerables en reactividad en el suelo, fundamentalmente debidas a las características del producto y granulometría. El AE es una fuente cada vez más utilizada en Latinoamérica. En el ámbito agropecuario, el AE es conocido principalmente como enmienda correctora de la alcalinidad de los suelos. Sin embargo, el uso del AE como fertilizante azufrado, también representa una alternativa importante. En la Argentina, si

bien el consumo actual es bajo, existe un potencial de crecimiento de esta fuente teniendo en cuenta la importante disponibilidad de yacimientos de este mineral en Jujuy, Salta y Catamarca (Peroni, 2005). Asimismo, el AE obtenido como subproducto de la industria petro-química, también puede ser desarrollado y adaptado para el uso agrícola. El AE presenta una importante versatilidad agronómica, ya que puede ser aplicado en forma directa o en mezclas físicas (blends). Como materia prima de mezclas físicas granuladas permite incrementar considerablemente la concentración de S en la formulación y obtener relaciones N-P-S o PS más balanceadas en relación a las fuentes solubles. En la última década se ha avanzado en el desarrollo de las fuentes de AE, tanto en las propiedades físicas (granulometría, velocidad de disgregación, etc.) como así también en el uso de aditivos “anti-polvo” que mejoraron notablemente la seguridad en el manejo de este tipo de materiales (riesgo de explosión) en plantas de fertilizantes.

En cuanto a los fertilizantes azufrados líquidos, en la Argentina se utilizan principalmente soluciones de SA (8% de N y 9% de S) y tiosulfato de amonio (TSA, 12% de N y 26% de S), que en general se mezclan con UAN (soluciones de urea y nitrato de amonio, 30-32% de N) para conformar formulaciones nitro-azufradas con contenidos variables de N y S. La principal limitante de las soluciones de SA es la baja concentración de nutrientes lograda, que incrementa el costo de transportes y manipuleo. Por el contrario, el TSA, que es la fuente azufrada líquida más desarrollada en el mundo, presenta mayor concentración de S en solución y actúa como inhibidor de la ureasa cuando se la mezcla con UAN (Uranga, 2007).

2.2-Propiedades físicas de fuentes azufradas

Fertilizantes sulfatados sólidos

El rango granulométrico de 2 a 4 mm es frecuentemente utilizado en fertilizantes azufrados solubles y resulta adecuado tanto para la disolución en el suelo, como así también para su distribución, manipuleo y aplicación a campo.

La dureza ideal de un fertilizante sólido debe ser superior a 2,5 kg, mientras que el rango de dureza de 1,5-2,5 kg permite lograr un funcionamiento aceptable si se implementan precauciones para el manipuleo. Cuando la dureza de los fertilizantes es baja (<1,5 kg), los gránulos tienden a romperse y formar polvo (Fertilizer Manual, 1998). Si bien el producto puede ser elaborado o formulado con una dureza y resistencia a la abrasión “aceptables”, a medida que el fertilizante es distribuido a través del circuito logístico, el material pierde calidad, siendo el incremento de las fracciones finas (polvo) el problema más frecuente de deterioro físico.

En los últimos años, algunos agro-minerales como el yeso agrícola se han difundido considerablemente en una gran variedad de formas físicas. Las principales formas de presentación física de los yesos ofrecidos en el mercado son *sólido-granulado*, *pelleteado* o *granulado* y *polvo*.

La presentación de “*sólido-granulado*” es la denominación que se le asigna a los yesos que luego de la extracción del yacimiento son triturados, zarandeados y “tamañados” a un determinado rango de granulometría.

El yeso “*granulado* o *pelleteado*” es aquel que luego de la extracción del yacimiento es molido a un tamaño fino y luego granulado mediante equipamiento específico a un rango granulométrico similar a los fertilizantes granulados de síntesis. En el proceso de *pelleteado*, la aglomeración se realiza a través de agentes ligantes. La concentración de aglomerante utilizado en el circuito de pelleteado tiene gran importancia ya que permite regular la dureza del material. Una cantidad baja incrementa la tendencia a la rotura, incrementando el contenido de polvo, mientras que una elevada concentración del ligante puede limitar la velocidad de disolución y disgregación del mineral en el

suelo. En términos generales, cuando el pelleteado es de buena calidad, se logran productos con una calidad física comparable a los fertilizantes granulados de síntesis química. La mejor disgregación del mineral de materiales pelleteados en agua o en el suelo no constituye una ventaja en efectividad agronómica en fuentes solubles como el YS. Esta ventaja resulta importante en agro-minerales muy poco solubles o insolubles como carbonatos, AE o roca fosfórica. Así, la ventaja principal del “pelleteado” de fuentes azufradas solubles es la uniformidad granulométrica, cuando el mismo se realiza adecuadamente. Esta uniformidad es similar a la que se obtiene en fertilizantes granulados de síntesis química de buena calidad.

La presentación de “polvo” resulta adecuada, en términos generales, cuando el mineral se lo utiliza como enmienda en corrección de suelos alcalinos, ya que se mejora la superficie de contacto entre el mineral y el suelo. Todas las presentaciones mencionadas se ofrecen en bolsas pero el uso del granel también es relevante y creciente. Una descripción detallada sobre las propiedades, calidad y manejo del YS puede ser consultado en Ponce y Torres Duggan (2005) y Torres Duggan (2007).

Azufre elemental

La granulometría constituye una propiedad física muy importante en las fuentes azufradas insolubles en agua como el AE, ya que incide en su reactividad en el suelo (velocidad de liberación de SO_4^{2-}) y en la efectividad agronómica (respuesta a la fertilización).

Existen diferentes procesos de elaboración del AE que le confieren al mineral propiedades físico-químicas particulares. Así, el AE se puede encontrar en forma granulada (2-4 mm), formando productos complejos (S agregado en forma fundida durante el proceso de granulación de fertilizantes nitrogenados o fosfatados) o recubriendo gránulos de fertilizantes (ej. ureas recubierta con AE) (Fan & Messick, 2007). En relación al AE presentado en forma de polvo fino, el riesgo de detonación bajo confinamiento, limita marcadamente su manejo en las plantas de fertilizantes.

En términos generales, la tendencia moderna es hacia la elaboración de fuentes de AE granuladas con granulometrías similares a las fuentes convencionales, que mejoran la seguridad en el manipuleo y facilitan el manejo logístico. Como ejemplos de estas fuentes podemos mencionar el AE granulado micronizado, en el que cada gránulo del fertilizante se forma a partir de la aglomeración de partículas finas del mineral a través de agentes ligantes y aditivos específicos, que mejoran la velocidad de disgregación y oxidación en el suelo.

Fuentes líquidas

En la Argentina se utilizan soluciones nitrogenadas o nitro-azufradas líquidas, siendo poco frecuente el uso de suspensiones o soluciones de polifosfatos (Torres Duggan 2008). Las principales ventajas de este tipo de fuentes son logísticas y de flexibilidad de aplicación. Las soluciones líquidas tienen como característica relevante su homogeneidad y la ausencia de materiales en suspensión. Cualquier material “extraño” que altere la claridad propia de este tipo de fuentes indica contaminación del producto durante la distribución y manipuleo (i.g., camiones cisterna con inadecuadas condiciones de limpieza, almacenamiento en tanques sucios, etc.).

Un aspecto de calidad que se debe tener en cuenta es el riesgo de ocurrencia de cristalización (“salting-out”) del producto durante el almacenamiento. En la tabla 2 se presentan las temperaturas de cristalización y densidad de las principales soluciones de UAN y TSA.

Tabla 2. Características físicas y químicas de soluciones nitrogenadas y nitro-azufradas líquidas (Fertilizer Manual, 1998, Leikam, 2007).

UAN 28	UAN 30	UAN 32	TSA
--------	--------	--------	-----

Densidad (g cm ³)	1.283	1.303	1.32	1,32
Temperatura de cristalización (°C)	-18	-10	-2	< -6°C

Este efecto se puede minimizar manejando diferentes tipos de UAN según región agro-climática. Así, las soluciones de UAN 28 o 30 resultan adecuadas en ambientes donde se pueden presentar bajas temperaturas, mientras que las soluciones de UAN 32 o TSA, se deben almacenar y/o aplicar en condiciones ambientales donde la probabilidad de ocurrencia de temperaturas menores a las de cristalización sea baja. Cuando ocurre la cristalización del producto, los cristales se acumulan en las paredes del tanque y luego pueden acumularse en la base del mismo, requiriendo calor, energía y recirculación para que los cristales retomen el estado de solución (Leikam, 2007).

La densidad *per se* no presenta una relevancia agronómica especial, aunque es un dato importante para la conversión de unidades de peso en volumen y viceversa, cuando se programa la fertilización.

Desde el punto de vista del usuario final del fertilizante azufrado, resulta fundamental verificar que el fertilizante utilizado este inscripto en el SENASA, que es el organismo encargado de la fiscalización del uso de fertilizantes y enmiendas en el país. Los productos inscriptos en este organismo, presentan las características y el número de inscripción en el rótulo del mismo, resultando una garantía de calidad importante. Cuando el fertilizante no esta inscripto en el SENASA y es comercializado por fuera del circuito oficial, el productor no puede conocer la calidad, efectividad y aptitud del fertilizante para el uso agropecuario. La descripción del marco legal y normativa vigente sobre calidad de fertilizantes excede el alcance de esta revisión y puede ser consultada en Torres Duggan (2007).

2.3.-Azufre en mezclas físicas y fertilizantes complejos

La tendencia en planteos de alta productividad es propender hacia esquemas de fertilización “balanceados” que implican aplicar en forma conjunta todos los nutrientes limitantes para el cultivo. En este contexto, resulta frecuente la utilización de *mezclas físicas*, muy difundidas en los países centrales y también en la Argentina. Las mezclas son una alternativa económica y eficiente ya que es posible satisfacer en forma precisa los requerimientos de varios nutrientes e incluso micronutrientes. Las empresas proveen a los productores mezclas preparadas o formulan en forma personalizada la mezcla adecuada para cada lote y/o cultivo previa recomendación del técnico, análisis de suelo mediante. Las mezcla física o mezcla física seca es una mezcla mecánica de dos o más productos que no sean químicamente reactivos o que reacción en forma mínima (Rodriguez 2007). Los *productos complejos* son fertilizantes con menor participación en el mercado comparados con las mezclas y pueden resultar adecuados en determinadas circunstancias técnico-económicas. A continuación se analizan las ventajas y desventajas de las mezclas y productos complejos, como así también algunas cuestiones que hacen a su calidad y manipuleo.

Mezclas físicas: compatibilidad química y física, higroscopicidad y manejo

La fertilización con S frecuentemente se realiza a través de mezclas físicas que contienen también N y/o P. Por ello, para evaluar la calidad y manejo de mezclas que contienen S, es necesario conocer la compatibilidad química y física de las mismas, a fin de procurar minimizar su impacto tanto durante su elaboración en las plantas de fertilizantes como en su distribución, almacenamiento y/o aplicación. Las mezclas físicas (blends) son considerablemente más económicas que los productos complejos, permitiendo a las empresas formuladoras obtener diferentes grados y relaciones de nutrientes con relativamente pocas fuentes de nutrientes (materias primas). Un adecuado manejo por parte de las empresas formuladoras, sumado a la implementación de buenas prácticas de manejo

del producto en el campo, permite alcanzar en términos generales un óptimo funcionamiento de este tipo de productos. Una mezcla física de buena calidad debe cumplir con los siguientes requisitos: tener flujo libre; estar libre de polvo; garantizar la concentración de nutrientes consignada en el rótulo del producto (según límites exigidos por la legislación vigente), y presentar una adecuada homogeneidad física.

Cuando dos o más fertilizantes simples se mezclan físicamente, la mezcla resultante presenta mayor higroscopicidad (mayor tendencia a absorber humedad del medio) que los fertilizantes individuales, sobre todo cuando las mezclas contienen urea o SA en una proporción considerable. Esto significa que las mezclas físicas presentan valores de humedad crítica relativa (HCR) más bajos que los fertilizantes individuales. La HCR es la humedad relativa del ambiente a una determinada temperatura (30°C) a partir de la cual el fertilizante comienza a absorber humedad del ambiente. La HCR se reduce marcadamente con el incremento de la temperatura (Figura 3).

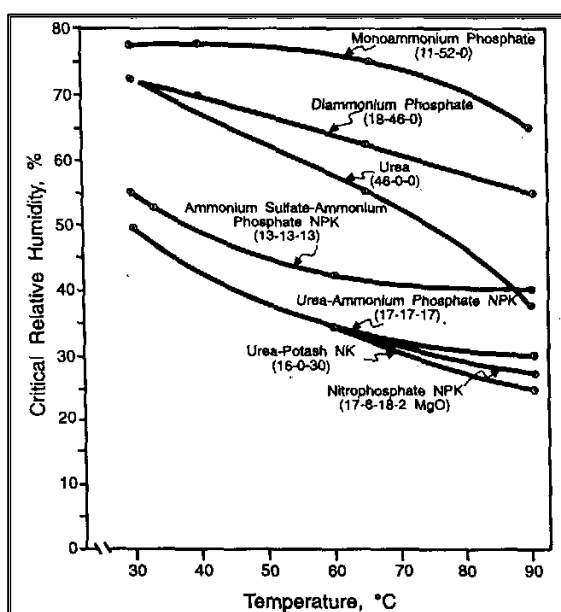


Figura 3. Relación entre la humedad crítica relativa (HCR) y la temperatura para diferentes fertilizantes simples y mezclas físicas (Fertilizar Manual, 1998).

Como se puede observar en la figura, a 30°C, fuentes como urea o fosfatos de amonio, presentan valores de HCR superiores a 70%. Por el contrario, mezclas de SA con fosfatos de amonio pueden alcanzar niveles de HC de alrededor de 55% y mezclas de urea con fosfatos de amonio menos de 50% de HCR. El incremento de la higroscopicidad y el riesgo de deterioro de la calidad es menor en mezclas físicas sin N o cuando se utilizan mezclas de fosfatos de amonio con superfosfatos y/o yeso con una baja relación P:S.

En términos generales, son pocos los casos de incompatibilidad entre fuentes utilizadas en mezclas físicas. La principal mezcla incompatible es la de urea y nitrato de amonio, que alcanza una HCR cercana al 18%, inviable para la distribución, almacenamiento y/o manejo a campo. El resto de las mezclas resultan compatibles o con compatibilidad limitada. Los casos de compatibilidad limitada se presentan en la mezcla de urea con superfosfatos, sobre todo en situaciones donde éstos últimos presenten un contenido de humedad elevado. También se considera poco recomendable almacenar o embolsar por tiempo prolongado las mezclas de DAP con superfosfatos (SPS o SPT), debido al alto riesgo de caking o endurecimiento (Leikam, 2007; Fertilizer Manual, 1998).

El riesgo de deterioro físico de mezclas o fuentes higroscópicas cuando hay condiciones ambientales predisponentes (temperaturas y/o humedad relativa elevadas), puede minimizarse reduciendo el tiempo de almacenamiento del producto en el campo. También, la fertilización debe realizarse bajo condiciones ambientales favorables, que permitan el libre flujo del fertilizante en los órganos de conducción y dosificación de las máquinas aplicadoras. El almacenamiento de fertilizantes en estructuras tipo “silo-bolsa”, debería realizarse bajo temperaturas frescas y baja humedad relativa para efectuar la carga. Además, se deben evitar filtraciones de humedad durante el tiempo de almacenamiento. Es importante verificar que el fertilizante almacenado no contenga excesiva humedad libre que pueda promover procesos de degradación del producto. Los contenidos de humedad libre de referencia son: 0-0,5% (fertilizantes nitrogenados o nitro-azufrados como urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio, etc.); 0,5-1% (mezclas que contienen urea o nitrato de amonio); 1-1,5% (mezclas con relaciones N: P₂O₅ mayores a 1:1, que no contienen urea o nitrato de amonio); 1,5-2% (mezclas con relaciones N: P₂O₅ menores a 1:1 que no contienen urea o nitrato de amonio); > 2% (mezclas con poco o nada de nitrógeno, mezcla de superfosfatos) (Fertilizer Manual, 1998).

La utilización en formulaciones de mezclas de fuentes con diferencias granulométricas muy marcadas puede producir la segregación de las partículas. Esto implica que cada fertilizante responderá de un modo diferencial a las acciones mecánicas a la que sean sometidos. Por el contrario, si las fuentes de nutrientes son homogéneas físicamente, responderán de manera similar a las acciones mecánicas generando lotes de producto uniformes desde el punto de vista físico y químico. La densidad de las materias primas y la forma del gránulo no son factores determinantes para lograr mezclas homogéneas. Solo el tamaño de partículas y su distribución debe considerarse para prevenir el proceso de segregación de partículas (Leikam, 2007). La segregación que más influencia tiene en la calidad física de fertilizantes es la denominada como “flujo de partícula” y se genera durante el almacenamiento y manipuleo de productos. Este tipo de segregación se conoce como “coning” y se presenta durante la formación de pilas cónicas en las plantas de fertilizantes. Otro tipo de segregación es la denominada “por vibración”, que se puede presentar durante el transporte de fertilizantes a granel. Cuando la masa de producto esta conformada por fuentes de nutrientes con tamaños de partícula muy diferentes, se puede producir “estratificación”. Este proceso podría ocurrir en despachos a distancias muy grandes, siendo poco relevante en fletes cortos o en productos embolsados.

La técnica más utilizada en la evaluación de la compatibilidad física de fertilizantes destinados a mezclas físicas es el “Número de Tamaño Guía” (*Size Guide Number*; SGN) desarrollado por el Canadian Fertilizer Institute. Este indicador se calcula para cada ingrediente de la mezcla. Surge de obtener, en primer lugar, la mediana de la distribución del peso acumulado del producto en una serie de mallas. Posteriormente, el SGN se calcula como el tamaño de partícula en mm que se corresponde con el 50% de acumulación del fertilizante, multiplicado por 100 y redondeado al cinco más cercano. Una vez que se calcula el SGN de cada ingrediente o materia prima de la mezcla, se comparan los valores y se analiza si los mismos se encuentran dentro de los límites de tolerancia (Tabla 3).

Tabla 3. Evaluación de compatibilidad de fertilizantes mediante el uso del SGN (Fertilizer Manual, 1998).

Diferencia en Número de Tamaño Guía (SGN)	Compatibilidad esperada
0-10%	Buena compatibilidad
11-20%	Moderada compatibilidad*
>20%	Incompatible

* Precauciones en manipuleo del producto pueden reducir las tendencias a la segregación.

En términos agronómicos, la segregación de partículas resulta importante ya que trae como consecuencia la variación del grado de fertilizante (disponibilidad de nutrientes) y la granulometría dentro del lote del producto. Así, cuando se mezclan fertilizantes con gran tendencia a la segregación (diferencias grandes en SGN), aumenta la heterogeneidad química con impactos potenciales en la distribución de nutrientes en el suelo durante la aplicación. Asimismo, se incrementa la variación en la calidad física (distribución de tamaños de gránulos) de los productos despachados. En general, las empresas más profesionalizadas y modernas, realizan un control de calidad de las propiedades físico-químicas de los productos. Una revisión detallada de la calidad y manejo de mezclas físicas puede ser consultada en Torres Duggan (2008).

Fertilizantes complejos: ventajas y desventajas en relación a mezclas físicas.

Los fertilizantes complejos son la variante más homogénea donde cada gránulo contiene todos los nutrientes distribuidos uniformemente y de acuerdo con las especificaciones de la fórmula. Estos productos pueden utilizarse en todos los planteos pero están indicados para cultivos de alto valor, en razón de su mayor costo. Estas fuentes se importan desde Alemania, Uruguay y Brasil (Melgar y Camozzi, 2002). Es por ello que su uso en cultivos extensivos es cuantitativamente inferior. Estas fuentes, cuando son elaboradas con tecnología moderna, tienen como ventaja su calidad físico-química. Los productos complejos y las mezclas físicas bien elaboradas (con adecuada compatibilidad física y química de sus materias primas) no presentan diferencias en efectividad agronómica, considerando un grado y tecnología de aplicación similares. En el caso de productos complejos que además son fertilizantes de liberación lenta o controlada, pueden observarse diferencias en eficiencia agronómica respecto de las mezclas físicas. Dichas diferencias dependen de las condiciones edafo-climáticas y sobre todo de las condiciones predisponentes para la ocurrencia de pérdidas de nutrientes; contexto en el cual los productos de liberación lenta o controlada presentan ventajas.

2.4. Reacción en el suelo, disponibilidad para las plantas y tecnología de aplicación

Fuentes sulfatadas solubles

La reacción de la fuente sulfatada en el suelo puede resultar importante en decisiones que tienen que ver con la tecnología de la fertilización: posibles pérdidas de S, fitotoxicidad, acidificación, etc. Los valores de pH de reacción inicial de los fertilizantes resultan importantes cuando se analizan procesos de fitotoxicidad de fertilizantes, mientras que la reacción final (ácida, neutra o básica) de la fuente de nutriente dependerá tanto de su forma química como de la capacidad buffer del suelo.

Si bien la industria de fertilizantes considera un valor de 3,5 kg de CaCO_3 como constante para neutralizar 1 kg de N del fertilizante nitrogenado agregado (ya sea para fuentes nitrogenadas como nitro-azufradas), cuando se analiza la influencia del fertilizante en la acidez edáfica, pueden intervenir varios factores además del índice de acidez de la fuente. Entre los principales factores tenemos el efecto rizosférico, el ión acompañante del N, el tipo de cultivo (mono o dicotiledónea) y la dosis de aplicación (Wallace, 1994). La acidez neta que se produce en el suelo tiende a ser mayor cuando se cultivan dicotiledóneas respecto de las monocotiledóneas. Las dicotiledóneas absorben mayor proporción de cationes y deben liberar protones para mantener el equilibrio electrónico, acidificando el suelo, proceso que se magnifica con el incremento de la dosis de fertilizante aplicado. Rodríguez et al (2004) observaron en condiciones de campo que la aplicación de sulfato de amonio al maíz redujo el pH significativamente respecto de los tratamientos testigo y nitrato de amonio calcáreo (5.6 vs 6.2).

En aplicaciones a suelo, los procesos de disolución involucran un volumen muy reducido de suelo, son temporarios y no tendrían gran influencia en el pH global del suelo, a pesar de que pueden incidir sobre la nutrición de los cultivos en alguna etapa fenológica específica (Young *et al.*, 1985). En términos generales, cuando la cantidad de nutriente aplicado (N o S) es similar al requerido por el cultivo, el riesgo de acidificación por fertilizantes azufrados amoniacales o formadores de amonio es bajo. Los fertilizantes azufrados amoniacales como el SA presentan una reacción ácida, ya que el amonio se nitrifica en el suelo liberando protones (iones hidrógeno). También el SPS, presenta una reacción ácida en el suelo debido a que presenta fosfato monocálcico, determinando pH cercanos a 1,5 alrededor del gránulo. Cuando se aplica SA o SPS en forma conjunta con semillas, es necesario considerar las dosis críticas permitidas para evitar o minimizar efectos fitotóxicos. Un detalle de las propiedades de los fertilizantes que inciden en la fitotoxicidad y el manejo de la misma puede ser consultado en Ciampitti *et al.* (2006). A diferencia de las fuentes mencionadas, el YS presenta una reacción neutra en el suelo, por lo cual en general determina menores problemas de fitotoxicidad que el SA o SPS, por lo menos en dosis frecuentes de aplicación (100 kg ha^{-1}).

En cuanto a los fertilizantes azufrados líquidos, resulta importante conocer la forma química en la se encuentra el S en el producto. Las formulaciones líquidas que utilizan SA, presentan una reacción similar a lo mencionado para las formas sólidas (reacción ácida). El TSA presenta una reacción ácida, produciendo partes iguales de S° y SO_4^{2-} . Una característica interesante del TSA es que, cuando se lo mezcla con UAN mejora la eficiencia del N aplicado, ya que actuaría como inhibidor de la ureasa (Uranga, 2007).

Una vez incorporado el fertilizante en el suelo (ya sea mecánicamente, por acción de la lluvia o del riego), las fuentes sulfatadas solubles pueden ser consideradas biodisponibles para las plantas. Los principales destinos del S agregado como sulfato al suelo son la remoción por el cultivo (principal salida del agro-ecosistema) y las pérdidas por lixiviación. Las pérdidas por lixiviación pueden ser considerables en suelos con textura gruesa y balances hídricos positivos que promueven la percolación. La información disponible para la Región pampeana es aún poco concluyente. La adsorción y las pérdidas gaseosas desde la superficie del suelo o desde las plantas presentan menor relevancia (Haneklaus *et al.*, 2000).

La movilidad del S-SO_4^{2-} en el suelo y el uso de fuentes solubles, permiten manejar las formas de aplicación con gran flexibilidad. Así, no son esperables diferencias en efectividad entre aplicaciones en bandas o a voleo. En relación al momento de aplicación en el doble cultivo trigo-soja 2da, ensayos conducidos en suelos Molisoles del norte de Buenos Aires por Salvagiotti *et al.* (2004) reportan eficiencias agronómicas similares para aplicaciones de la dosis de S requerido para la secuencia de cultivos, al cultivo de trigo o a cada cultivo por separado. Así, en condiciones edafoclimáticas similares a las mencionadas, la decisión del momento de aplicación quedaría determinada por factores operativos o financieros.

Azufre elemental

El AE presenta un funcionamiento en el sistema suelo-cultivo bastante diferente a las fuentes sulfatadas solubles, incidiendo marcadamente en su manejo tecnológico. La oxidación del AE en el suelo sucede a través de procesos químicos y bioquímicos, con predominio de las reacciones microbianas, con influencia de varios factores (Tabatabai, 2005). La oxidación implica el pasaje de S° a SO_4^{2-} a través de una reacción fuertemente ácida, con liberación de ácido sulfúrico. Esta es la reacción que se aprovecha cuando se utiliza AE en corrección de la alcalinidad de los suelos. Los grupos de organismos que participan en la oxidación son: (1) quimiautotróficos (i. g., bacterias del género *Thiobacillus*.), (2) fotoautotróficos y (3) heterótrofos (un amplio espectro de bacterias y hongos). Los primeros dos grupos son los responsables de la reducción de compuestos reducidos de S en suelos bien drenados. La oxidación del AE es la resultante de la interacción de varios factores

relacionados con el ambiente edáfico y también del tipo de fuente de AE utilizada (Horowitz & Meurer, 2005) (Figura 4).

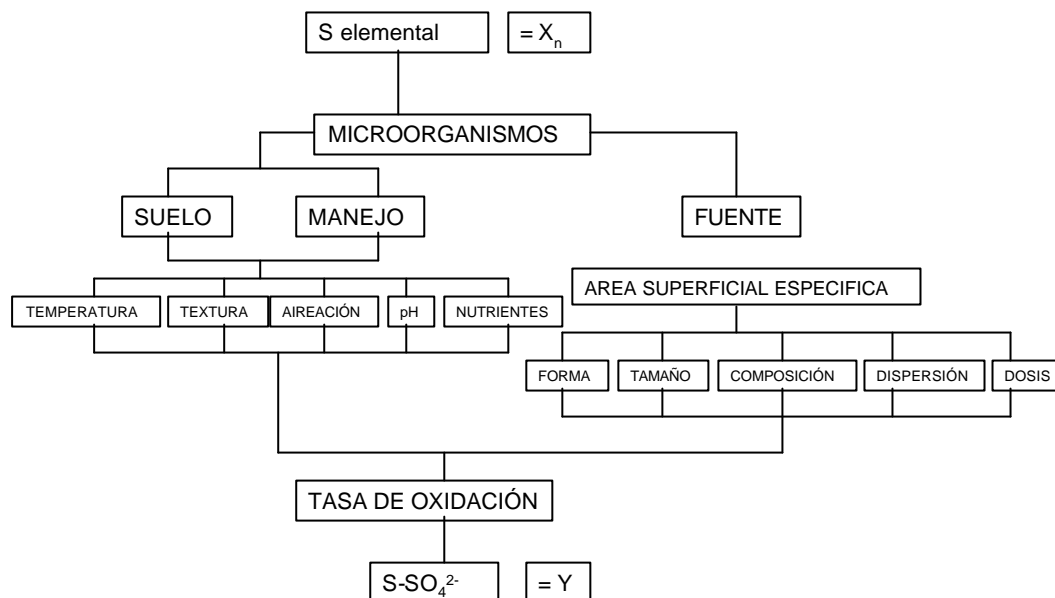


Figura 4. Diagrama de relaciones entre las variables independientes (X_n) y dependientes (Y) que inciden en la oxidación del azufre elemental a sulfato (Horowitz, 2005).

Si bien no es posible establecer de un modo general un tamaño de partícula óptimo para el AE que se utiliza en fertilización de cultivos, la evidencia experimental de los últimos años indica que los tamaños de partícula más apropiados se logran con granulometrías inferiores a $<0,2-0,3$ mm, consideradas más reactivas y efectivas. Tamaños de partículas más grandes limitan el acceso microbiano y ritmo de oxidación, sobre todo cuando se presentan condiciones ambientales poco favorables como bajas temperaturas y/o escasa disponibilidad hídrica. Por tratarse de procesos microbiológicos, la temperatura y humedad impactan de un modo preponderante en el proceso de oxidación. Así, con temperaturas entre $10-40$ °C la oxidación se incrementa en forma lineal y con temperaturas menores a 4 °C se torna muy lenta (Blair *et al.*, 1993). La temperatura óptima para la oxidación se encuentra en el rango de 25 y 40 °C. En relación a la humedad edáfica, suelos muy secos o excesivamente húmedos reducen la oxidación del AE, mientras que el óptimo de oxidación se obtiene con contenidos hídricos cercanos a capacidad de campo (Tisdale *et al.*, 1993).

3-¿CÓMO INCIDE LA FORMA DE S Y SOLUBILIDAD DE LAS FUENTES AZUFRADAS EN LA EFECTIVIDAD AGRONÓMICA?.

Dentro del grupo de los fertilizantes sulfatados “solubles”, las variaciones en la magnitud de la solubilidad en agua (g L^{-1} del fertilizante a una determinada temperatura) resulta un aspecto relevante cuando el fertilizante se aplica con el agua de riego (fertirriego) en cultivos intensivos. En estos cultivos, la solubilidad *per se* de los fertilizantes resulta una propiedad básica para evaluar las posibilidades de fertirrigación. En este tipo de sistemas, se utilizan fertilizantes denominados “hidro-solubles” o cristalinos que se caracterizan por su elevada solubilidad en agua y muy bajo contenido de impurezas. Un detalle sobre la temática se puede consultar en Fernández y Torres Duggan (2008). En cultivos extensivos de grano, donde la fertilización se realiza principalmente al suelo, el escenario es completamente distinto. Se describen a continuación algunas experiencias de

evaluación de la efectividad agronómica de fuentes sulfatadas solubles y también de éstas con el AE.

3.1-Efectividad agronómica de fuentes azufradas solubles

La efectividad de las fuentes sulfatadas solubles en fertilización de cultivos no ha mostrado diferencias (Tisdale *et al.*, 1993). Cuando estos fertilizantes son aplicados al suelo en áreas templadas o cálidas donde hay adecuada disponibilidad hídrica, la lámina de agua disponible en el suelo resultaría lo suficientemente abundante como para garantizar la disolución de las fuentes sulfatadas en el suelo y la biodisponibilidad de los SO_4^{2-} , aún en el caso de fertilizantes muy poco solubles en agua como el YS. Torres Duggan *et al.*, (2006) compararon la efectividad agronómica de dos formas de presentación física de YS (“peleteada” y “sólido-granulado”), SA y SPS en trigo, en un experimento a campo conducido en un suelo Argiudol típico de Rafaela (Santa Fe, Argentina). Todas las fuentes se aplicaron con las mismas dosis (15 y 30 kg ha⁻¹ de S) y forma de aplicación, determinando respuestas similares. En la misma región agro-ecológica, Gutierrez Boem *et al.*, (2007), reportaron resultados semejantes para la soja fertilizada con YS y SA.

3.2-Efectividad de fuentes azufradas solubles en relación al AE

A diferencia de lo que ocurre con las fuentes azufradas solubles, existe menor información experimental a campo en cultivos de grano que comparen la efectividad agronómica del AE en relación a las fuentes solubles. La mayoría de las experiencias se concentran, o bien en la evaluación de las respuestas con una o más fuentes sulfatadas solubles o solo en la cuantificación de las respuestas con AE.

Ensayos con pasturas en condiciones controladas indicaron mayor residualidad del AE en relación a fuentes sulfatadas solubles (Lefroy *et al.*, 1994). El YS resultó más efectivo que el AE en las primeras semanas y luego el AE fue mejorando progresivamente su performance, superando al YA en las últimos cortes. Cuando el YS superó al AE en efectividad, la recuperación de S (% del S absorbido en relación al S aplicado) también fue mayor, evidenciando la inmediata disponibilidad de S- SO_4^{2-} . Por el contrario, con el AE la recuperación de S en la biomasa forrajera fue baja en las primeras semanas y se incrementó progresivamente hasta igualar al YS en las últimas semanas.

La liberación progresiva y sostenida de los SO_4^{2-} del AE, confiere en términos generales un carácter más residual en relación a las fuentes solubles y lo ubican como una fuente potencialmente más efectiva en cultivos plurianuales como pasturas y/o frutales. La información disponible acerca de la efectividad del AE en cultivos anuales (efecto directo) es aún poco concluyente y depende considerablemente del tipo de fuente de AE y las condiciones ambientales. Ensayos de larga duración realizados por Girma *et al.*, (2005) reportan que el YS aplicado al trigo generó rendimientos más elevados y consistentes que el AE y solo en pocos sitios donde se registraron fuertes lluvias el YS determinó un rendimiento menor que con AE, debido a la lixiviación de los sulfatos del YS. A diferencia de lo que ocurre con fuentes azufradas solubles, cuando se fertiliza con fuentes de AE, las condiciones ambientales pueden incidir considerablemente en la efectividad agronómica. Condiciones ambientales adversas para la oxidación como sequía en el estrato superficial del suelo o bajas temperaturas durante el invierno, pueden reducir la liberación de SO_4^{2-} desde el AE (Mc Caskill & Blair, 1989).

Las fuentes de AE granuladas “reactivas” (AE micronizado, AE “pre-tratado”, etc.) poseen mejor capacidad de liberar SO_4^{2-} dentro del año de aplicación y más aún, podrían resultar efectivas agronómicamente aún en cultivos de invierno. Evidencias de respuestas directas a la fertilización

con una fuente reactiva de AE fueron reportadas recientemente por Tysko y Rodríguez (2006) en ensayos de campo conducidos en suelos del norte y centro-sur de Santa Fe (Argentina). Se observaron respuestas significativas a la fertilización en 3 de 5 ensayos establecidos en trigo, mientras que no hallaron efectos residuales en la soja de 2da.

En relación a la tecnología de aplicación, en términos generales se recomienda que el AE se aplique en forma superficial, permitiendo la disgregación del mineral y las posibilidades de contacto con el suelo. Las fuentes de AE modernas disponen de agentes o aditivos que mejoran el ritmo de disgregación en el suelo. La incorporación subsuperficial en el suelo limita la exposición del mineral, pudiendo prolongar el tiempo necesario para la oxidación.

4-CONCLUSIONES

- ? Dentro de un escenario de Buenas Prácticas de Manejo de bs fertilizantes azufrados, el conocimiento de las propiedades y atributos de las fuentes resulta fundamental para seleccionar la fuente correcta. Las propiedades químicas y físicas de las fuentes azufradas puede incidir marcadamente en su efectividad agronómica y manejo logístico, dependiendo del tipo de fuente.
- ? Desde el punto de vista agronómico, es posible diferenciar dos grupos de fuentes azufradas: fuentes sulfatadas solubles e insolubles como el AE. Las fuentes solubles presentan una efectividad agronómica similar cuando son manejadas con la misma dosis y tecnología de aplicación. La respuesta a la fertilización con el AE depende de factores ambientales, del tipo de suelo y de la composición química del AE.
- ? Las fuentes sulfatadas solubles se pueden aplicar tanto al voleo como en bandas, sin esperar diferencias entre formas de aplicación. Por el contrario, la forma y momento de aplicación del AE dependerá de la reactividad de la fuente y condiciones edafo-climáticas.
- ? La incidencia de la granulometría en la efectividad agronómica resulta más importante en el AE que en las fuentes solubles, ya que modifica su reactividad en el suelo y su capacidad de proveer sulfatos disponibles para las plantas.
- ? El desarrollo de polvo es un problema frecuente en la distribución y manejo de fertilizantes sólidos y puede resultar especialmente problemático en materiales “pelleteados” de mala calidad.
- ? Cuando se manejan mezclas físicas NPS o PS, se debe considerar la compatibilidad química y física de los fertilizantes. Un adecuado manejo en las plantas de elaboración como en las etapas de distribución, almacenamiento y aplicación, permiten, en términos generales, un buen comportamiento de este tipo de productos. Los fertilizantes complejos, resultan en general más caros por unidad de nutriente pero tienen como principal ventaja la uniformidad química.
- ? Las fuentes azufradas líquidas presentan ventajas fundamentalmente logísticas y de flexibilidad de aplicación. El riesgo de cristalización del producto durante el almacenamiento constituye un problema de calidad que puede ser minimizado a partir de la selección de la fuente de UAN indicada según condición agro-climática.
- ? Aún quedan importantes ítems por desarrollar en el contexto de la calidad y atributos de los fertilizantes azufrados que resultan indispensables para el manejo agronómicos de estas fuentes.

5-BIBLIOGRAFÍA

Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., Dana, M., Anderson, G.C. 1993. Modelling of sulphur oxidation from elemental sulfur. *Plant and Soil*. 155/156: 379-382.

- Bruulsema, T., Chen, F., García, F., Ivanova, S., Li, S., Rao, N., Witt, C. 2008.** A global framework for Best Management Practices for Fertilizer Use. IPNI Concept Paper # 1-March. 10p.
- Ciampitti I.A., H. Fontanetto, F.G. Micucci, F.O. Garcia. 2006.** Manejo y ubicación del fertilizante junto con la semilla: efectos fitotóxicos. IPNI Cono Sur. Archivo Agronómico N°10. www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf
- Darwich, N. A. 2005.** Los Nutrientes Secundarios: azufre, calcio y magnesio. Capítulo VII. En: Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Talleres de Gráfica Armedenho. Segunda Edición. 289 p.
- Echeverría, H.E. 2005.** Azufre. En: Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos. H. Echeverría y F. García, Editores. Ediciones INTA. 525 p.
- Eriksen, J. 2005.** Gross sulphur mineralization-immobilisation turnover in soil amended with plan residues. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 2216-2224.
- Fan, M.X., Messick, D. L. 2007.** Correcting Sulphur Deficiency for Higher Productivity and Fertilizer Efficiency. The Sulphur Institute (TSI). United States. Washington. 11 p.
- FAO, 2004.** Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 p
- Fernández H., Torres Duggan, M. 2008.** Fertilización en cultivos florales y ornamentales. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Segunda Edición. Hemisferio Sur-INTA. R. Melgar y M. Díaz Zorita. Coordinadores. 569 p.
- Fertilizantes América Latina. 2004.** Año 9 N°2. Noviembre. Azufre. Usos y aplicaciones del azufre agrícola en los mercados Latinoamericanos. 11-19 p.
- Fertilizer Manual. 1998.** United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC). 615 p.
- Girma, K., Mosali, J., Freeman, K.W., Raun, W.R. 2005.** Forage and Grain Yield Response to Applied Sulfur in Winter Wheat as Influenced by Source and Rate.
- Gutiérrez Boem, F. H. 2006.** Azufre. En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados. R. Alvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 p.
- Gutiérrez Boem; F.H., Prystupa, P., Ferraris, G. 2007.** Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104, 2007.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2000.** Sulphur in agroecosystems. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis*. 204 Agricultura (81): 17-32
- Horowitz, N., Meurer, E.J., Enofre. 2005.** Uso de enxofre elementar como fertilizante. En: Informacoes Agronomicas. N°12. Dezembro. POTAFOS.
- IPNI, 2007.** Agriculture and the fertilizer market in Argentina. Regional update, diciembre 2007. Disponible en www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf.
- Leikam, D.F. 2007.** Fertilizer sources, technology and management. En: Simposio de Tecnología de la fertilización. Rodríguez, M., Torres Duggan, M., Gambaudo, S. Editores. CD. ISBN 978-987-21419-8-1.
- Lefroy, R.D.B., Dana, M., Blair, G. 1994.** A glasshouse evaluation of sulfur fertilizer sources for crops and pastures. III: Soluble and non-soluble sulfur and phosphorus sources for pastures. *Aust. J. Agric. Res.*, 45, 1525-37
- Mc Caskill, M. R., Blair, G. 1989.** A model for the release of sulfur from elemental S and superphosphate. *Fertilizer Research* 19: 77-84.
- Melgar, R.; Camozzi, M.E. Guía 2002.** Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. INTA. 259 p.
- Melgar, R., 2005.** El mercado de fertilizantes en la Argentina y su relación con el sector agropecuario. En: Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos. H. Echeverría y F. García, Editores. Ediciones INTA. 525 p.
- Pernoni, J. 2005.** Argentina. En: Otros minerales. L. Castro y R. Melgar (coordinadores). Capítulo VII. Minerales para la agricultura en Latinoamérica. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (Editores). 574 p. CyTED.UNSAM-OLAMI.

- Porta J., M. López Acevedo, C. Roquero. 2003.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Editorial Mundi-Prensa. Tercera Edición. 929 p.
- Ponce, B y Torres Duggan, M (ex aequo). 2005.** Yeso. En: Minerales para la agricultura en Latinoamérica. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (Editores). 574 p. CyTED.UNSAM-OLAMI.
- PPI-1997.** Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Potash and Phosphate Institute (PPI). Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC). 74 p.
- Roberts, T.L. 2007.** Right product, right rate, right time and right place...the foundation of best management practices for fertilizer. 29-32 p. In: Fertilizer Best Management Practices. IFA. International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (FBMPs)-7-9 march, 2007. Brussels, Belgium.
- Rodríguez, M.B.; M.A. Taboada; D.J. Cosentino. 1999.** Influence of growing plants and nitrogen fertilizer on saturated hydraulic conductivity. *Commun Soil Sci Plant Anal* 30 (11&12): 1681-1689.
- Rodríguez M.B. 2007.** Caracterización de fertilizantes: propiedades determinantes de su calidad agronómica. En: Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. P. Prystupa (Ed). Editorial Facultad de Agronomía ISBN: 978-950-29-1012-3.
- Rodríguez, M.B. 2008.** Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En: La fertilización de cultivos y pasturas. R. Melgar y M Díaz Zorita. 2ª ed. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 2008. 588 p. ISBN 978-950-504-597-6.
- Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigaluppo, S., Castellarín, J., Galarza, C., González, N., Gudelj, V., Novello, O., Pedrol, H., Vallone, P., 2004.** Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22 (2) 92-101 p.
- Tabatabai, M.A., 2005.** Chemistry of sulfur in soils. In: Chemical Processes in Soils. M.A Tabatabai and D.L Sparks (Co-editors). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., Havlin, J.L. 1993.** Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. In: Soil Fertility and Fertilizers. Fifth edition. Macmillan Publishing Company. 634 p.
- Torres Duggan M. 2008.** Fertilizantes químicos y minerales. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Segunda Edición. Hemisferio Sur-INTA. R. Melgar y M. Díaz Zorita. Coordinadores. 569 p.
- Torres Duggan, M. 2007.** Calidad de fertilizantes. ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico?. En: Simposio "Fertilidad 2007". "Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos". Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) y Fertilizar Asociación Civil. García, F y Ciampiti, I. Editores. 160 pp.
- Torres Duggan, M; Gambaudo, S.; Quaino, O. 2006.** Evaluación de fuentes azufradas en trigo en un suelo Argiudol Típico de Santa Fe-Argentina. CD Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo-Salta. Argentina.
- Tysko M. B., Rodríguez, M. 2006.** Respuesta de trigo-soja en el doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 24 (2): 139-146,
- Uranga, M. 2007.** Avances tecnológicos en fertilizantes líquidos. 13 pp. En: Simposio de Tecnología de la fertilización. Rodríguez, M., Torres Duggan, M., Gambaudo, S. Editores. CD. ISBN 978-987-21419-8-1.
- Wallace, A. 1994.** Soil acidification from use of too much fertilizer. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 97-92
- Young, R.D.; Wesfall, D.G.; Colliver, G.W. 1985.** Production, marketing and use of phosphorus fertilizers. p 323-376. In: Fertilizer Technology and Use. O.P Engelstad, editor. Soil Science of Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 631 p.